

Epoxidharzbeschichtete Bewehrung in der Praxis – Bewertung der Korrosionsschutzwirkung nach 21 Jahren Nutzungsdauer anhand eines deutschen Pilotprojektes

Marc Zintel

Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der Technischen Universität München

Christoph Gehlen

Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der Technischen Universität München

Sylvia Keßler

Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der Technischen Universität München

Zusammenfassung

Um die Korrosion von Stahl in Beton infolge Chlorideinwirkung zu ver- oder zumindest zu behindern, werden bisher vornehmlich in Nordamerika beachtliche Mengen epoxidharzbeschichteter Bewehrung (ECR) eingesetzt. Die Wirkungsweise und damit das Korrosionsschutzpotential von ECR werden in der Wissenschaft zum Teil kontrovers diskutiert. Im Jahr 1991 wurde diese Art des Korrosionsschutzes in einem deutschen Pilotprojekt an einer Brücke in Leverkusen erstmalig eingesetzt. Nicht zuletzt aufgrund fehlender Informationen über das Langzeitverhalten von ECR fand bisher kein nachhaltiger Technologietransfer nach Deutschland bzw. Europa statt.

Die dargestellten Untersuchungsergebnisse im Zuge einer Bauwerksinspektion nach 21 Jahren Nutzungsdauer liefern einen entscheidenden Baustein zur quantitativen Bewertung des Korrosionsschutzpotentials epoxidharzbeschichteter Bewehrung.

1. Einleitung

Zur Erzielung einer verbesserten Dauerhaftigkeit von Stahlbetonkonstruktionen werden seit den 70er Jahren vornehmlich in Nordamerika epoxidharzbeschichtete Bewehrungsstähle eingesetzt. Sie sollen eine anodische Eisenauflösung ver- oder behindern. An einigen Bauwerken ging allerdings schon unerwartet früh, diese durch die Epoxidharzbeschichtung erhoffte Korrosionsschutzwirkung verloren (vgl. Korrosionsschäden an den Florida Key Bridges in USA Anfang der 1980er Jahre). Man ging davon aus, dass der vorzeitige Verlust einerseits auf eine mangelhafte Qualität des Epoxidharzes, andererseits auf eine durch fehlerhafte Applikation hervorgerufene hohe Fehlstellenanzahl zurückzuführen ist. Durch Weiterentwicklungen in der Beschichtungstechnologie (u.a. verbesserte Harzsysteme und Verfahrenstechnik der Applikation) sowie durch gestiegene normative Anforderungen (z.B. bezüglich der Mindestschichtdicke) konnten bis heute Fortschritte erzielt werden [1].

Ein einheitlicher wissenschaftlicher Konsens zur Bewertung des Korrosionsschutzpotentials eines solchen Produkts wurde dennoch bisher nicht erreicht. Trotz einer gewissen Zurückhaltung gegenüber diesem Produkt existieren in Nordamerika inzwischen mehr als

74.000 Brücken mit ECR, die auch hinsichtlich ihrer Korrosionsbeständigkeit Fragen aufwerfen könnten. Ein Technologietransfer nach Europa fand bisher nicht statt.

In Deutschland wurde im Jahr 1991 in einem einmaligen Pilotprojekt die neueste Generation epoxidharzbeschichteter Bewehrung in einer Brückenkappe eingesetzt.

Im Zuge einer Brückeninspektion im Jahr 2012 wurde speziell die eingesetzte beschichtete Bewehrung untersucht. Vor Ort kamen zerstörende und zerstörungsfreie Prüfmethoden zum Einsatz. Zudem wurden entnommene Bohrkernproben anschließend im Labor quantitativ untersucht. Die vielfältigen Untersuchungsergebnisse liefern die Bewertungsgrundlage zur Einschätzung des Korrosionsschutzpotentials epoxidharzbeschichteter Bewehrung nach einer Nutzungsdauer von 21 Jahren.

2. Schädigungsprozess der chloridinduzierten Korrosion

Stahl eingebettet in Beton ist durch die hohe Alkalität der Porenlösung ($\text{pH} > 12$) geschützt. In diesem Milieu bilden die Hydroxid- (OH^-) und Eisenionen eine schützende Oxidschicht auf der Stahloberfläche. Diese so-

genannte Passivschicht kann durch das Eindringen von Chloriden (z.B. aus Tausalzen) zerstört werden.

Wird eine kritische Chloridkonzentration an der Stahloberfläche erreicht, depassiviert der Stahl und die schützende Passivschicht wird lokal zerstört. Erst nach der Depassivierung kann der eigentliche Korrosionsprozess beginnen. Hierbei gehen Eisenionen (Fe^{2+}) in der Porenlösung in Lösung und freie Elektronen verlassen das Stahlgitter (anodische Eisenauflösung). Dieser Prozess geht mit einem Abfall des elektrochemischen Potentials an der lokalen Anode einher, was zu einer Potentialdifferenz zwischen den anodischen und passiven kathodischen Oberflächen führt. Anoden und Kathoden sind im Normalfall elektrisch verbunden, was zu einem ungehinderten Transport freier Elektronen Richtung kathodischer Bereiche führt. Hier bilden sich Hydroxidionen durch Reaktion von Wasser mit Sauerstoff in der Porenlösung. Die positiv-geladenen Eisenionen und die negativ-geladenen Hydroxidionen streben nach einem Gleichgewicht. Zum Ladungsausgleich werden negative Ladungen von der Kathode zur Anode transportiert. In Bild 1 sind die Zusammenhänge der chloridinduzierten Korrosion in Form einer sogenannten Makrokorrosionszelle zusammengefasst.

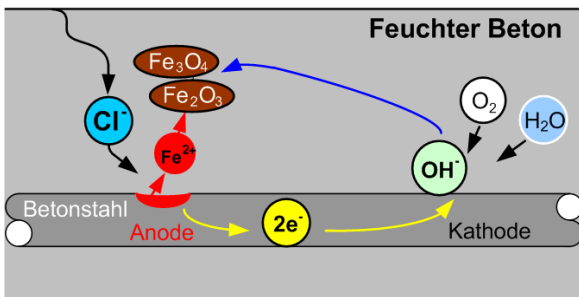


Bild 1: Schematische Darstellung der Korrosion von Stahl in Beton am Beispiel eines Makrokorrosionselements [2]

Mit fortschreitender Korrosion reduziert sich der Stahlquerschnitt. Daneben haben die Korrosionsprodukte (z.B. Fe_2O_3) unterschiedliche Eigenschaften wie das Ausgangsprodukt. Ein größeres Volumen der Korrosionsprodukte (bis zu Faktor 6) im Vergleich zum Stahl verursacht expansionsinduzierte Verformungen in der Betonmatrix, was zu Rissbildung und Abplatzungen führen kann.

Im Degradationsverlauf der chloridinduzierte Bewehrungskorrosion unterscheidet man generell zwei Phasen (siehe Bild 2).

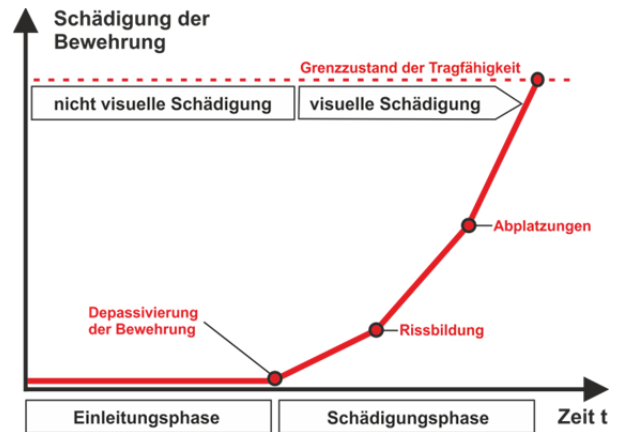


Bild 2: Zeitliche Entwicklung der Bewehrungskorrosion

Während der ersten Phase, der so genannten Einleitungsphase, dringen Chloride infolge unterschiedlicher Transportmechanismen von der Bauteiloberseite in den Beton ein. Eine Schädigung der Bewehrung selbst findet in dieser Phase nicht statt. Die Einleitungsphase endet mit der Depassivierung der Bewehrungsoberfläche. Die Bewehrungskorrosion setzt erst in der an die Depassivierung anschließenden Schädigungsphase ein. Rissbildungen und Abplatzungen der Betondeckung als erste visuell erkennbare Folge der Bewehrungskorrosion treten erst im fortgeschrittenen Stadium auf.

3. Epoxidharzbeschichtete Bewehrung (ECR)

3.1 Herstellungsprozess

Epoxidharzbeschichtungen werden aus einem Epoxidharz (meist Bisphenol-A-Epoxidharz) und einem Härter hergestellt. Für zahlreiche Anwendungsfälle können die Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften der reinen Polymere durch Hilfs- und Füllstoffe (z.B. Pigment, Füllstoffe, Additive) maßgeblich beeinflusst werden.

Vor der eigentlichen Applikation der Beschichtung wird die Stahloberfläche durch Sandstrahlen gereinigt und angeraut. Danach wird die Bewehrung durch Induktions-Heizspulen auf rd. 250°C erhitzt und in die Beschichtungskabine transportiert. Das elektrostatisch aufgeladene Pulver setzt sich auf der Bewehrung ab, schmilzt, fließt und bildet eine gleichmäßige Schicht. Nach Abkühlung der Beschichtung wird diese mittels Detektoren auf Fehlstellen untersucht. Eine schematische Darstellung der Applikationsanlage ist in Bild 3 dargestellt.

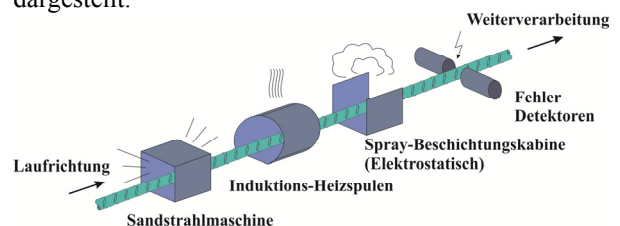


Bild 3: Schematische Darstellung einer Applikationsanlage

Im Herstellungsprozess werden mittlere Beschichtungsdicken von ca. 250 µm eingestellt.

3.2 Korrosionsschutzpotential

Mit der Anwendung von ECR sollen mindestens eine, besser gleich mehrere Voraussetzungen zur Bewehrungskorrosion ausgeschaltet werden:

- Depassivierende Medien sollen vom Stahl ferngehalten werden (speziell Chloride)
- Das Sauerstoffangebot an der Kathode soll minimiert werden
- Der wässrige Elektrolyt (Beton) soll vom Stahl abgeschirmt werden
- Die Ausbildung von Potentialdifferenzen soll verhindert werden

Alle zuvor genannten Effekte sind eng mit der Dichtigkeit und nicht zuletzt mit dem Beschichtungswiderstand der Epoxidharzbeschichtung selbst verknüpft. Jedoch sind Epoxidharzbeschichtungen, wie auch alle anderen organischen Beschichtungen nur begrenzt undurchlässig gegen Wasser und Sauerstoff. Aus diesem Grund können Korrosionsprozesse unterhalb solcher Beschichtungen nicht komplett ausgeschlossen werden. Die dazugehörigen Transportprozesse sind in der Regel diffusionskontrolliert. Neben den Transportprozessen haben Informationen über die Speichermechanismen von eingeschlossenem Wasser eine wesentliche Bedeutung zur Dauerhaftigkeitsbewertung von Epoxidharzbeschichtungen.

Hieraus können wichtige Voraussetzungen zur Garantie eines Korrosionsschutzes gefolgert werden:

- Qualität des Materials (Wasserabsorption, Diffusionsseigenschaften usw.)
- Herstellungsqualität (Beschichtungsdicke, Anzahl und Größe von Fehlstellen usw.)
- Qualität der Adhäsion (Verbundfestigkeit zwischen Betonstahl und Beschichtung)

Hinsichtlich Verarbeitung und Beständigkeit epoxidharzbeschichteter Bewehrung sind zusätzliche Anforderungen für den praktischen Einsatz unerlässlich:

- Alkalibeständigkeit (Betonporenlösung: pH = 13)
- Biegefähigkeit (keine Risse, Enthftung oder Quetschungen)
- Verbund (ausreichende Verbundfestigkeit: Betonstahl/Beschichtung und Beschichtung/Beton)
- Lagerungsstabilität (Wetter, UV-Strahlung)
- Vorschriften zur Handhabung von ECR (im Baustelleneinsatz: z.B. Transport, Lagerung und Installation)
- Dynamische Beanspruchung (keine Risse, Schäden)
- Alterung (lastabhängig und lastunabhängig)
- Möglichkeit zur Inspektion und Instandsetzung (geeignetes Ausbesserungsmaterial)

Trotz aller möglichen gemeisterten Herausforderungen kann für einen erfolgreichen Applikationsprozess und der späteren Baustelleninstallation kein komplett fehl-

stellenfreies Produkt garantiert werden. Die Fragestellung des Korrosionsfortschritts und hierbei speziell die Modellierung ablaufender Korrosionsprozesse eines Systems mit keinen oder gerade noch tolerierbaren Fehlstellen ist derzeit Gegenstand aktueller Forschung. In Bild 4 ist der mögliche Korrosionsschutzeffekt von ECR im Vergleich zu unbeschichtetem Betonstahl über die Lebensdauer schematisch dargestellt.

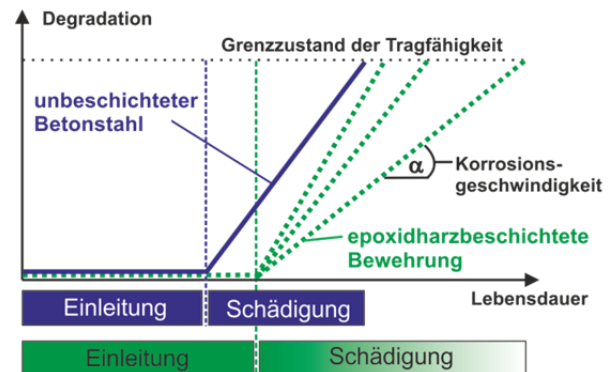


Bild 4: Möglicher Korrosionsschutzeffekt epoxidharzbeschichteter Bewehrung (ECR) im Vergleich zu unbeschichtetem Betonstahl [3]

Im Unterschied zu unbeschichtetem Betonstahl beschreibt die Einleitungsphase bei ECR ein fehlerstellenfreies Beschichtungssystem, bei dem sich je nach Expositionsbedingung (z.B. infolge Temperatur/-feuchte und Art des umgebenden Betons) unterschiedliche Feuchtegehalte innerhalb der Beschichtung einstellen. Eine Wasseraufnahme über die Zeit ist eng mit dem Rückgang der elektrisch-isolierenden Wirkung der Beschichtung (Beschichtungswiderstand) verknüpft (vgl. Kap. 4). Die Einleitungsphase endet, sobald sich eine Fehlstelle entwickelt und eine Depassivierung erfolgt (Fehlstelle wirkt als Anode, s. Kap. 2). Die Korrosionsgeschwindigkeit in der nachfolgenden Schädigungsphase wird maßgeblich von der Fehlstellengröße, umso mehr aber vom Ausmaß einer möglichen Fehlstelleninteraktion mit anderen benachbarten Defekten (vgl. Makrokorrosionselementbildung in Kap. 2) bestimmt.

3.3 Bestehende Normen und Richtlinien

Die erste (Prüf-)norm, die in Zusammenhang mit epoxidharzbeschichteter Bewehrung im Jahr 1981 in Kraft trat, war die amerikanische Norm ASTM A 775 - 81. Die Norm wurde im Laufe der Jahre anhand von Ergebnissen aus intensiven Untersuchungen angepasst und erweitert. Die aktuelle Version stellt die Norm ASTM A 775/A 775M - 07b [4] dar.

In Europa wurde epoxidharzbeschichtete Bewehrung bis Ende der 80er Jahre nur in Einzelfällen verbaut. In Großbritannien wurde erstmalig im Jahre 1990 eine Norm BS 7295:1990 eingeführt, die 9 Jahre später durch die heute gültige Norm BS ISO 14654 [5] und die BS ISO 14656 [6] ersetzt wurde. Dabei bezieht sich die BS ISO 14654 („Epoxidbeschichteter Beton-

bewehrungsstahl“) auf das System „beschichtete Bewehrung“ und die BS ISO 14656 („Epoxidpulver und Dichtungsstoffe für die Beschichtung von Stahl für die Bewehrung von Beton“) auf das Epoxidharz selbst. In anderen europäischen Ländern wurden bisher nur Richtlinien eingeführt:

- Deutschland, Institut für Bautechnik (DIBt), 1990 [7]
- Schweiz, Bundesamt für Straßen (ASTRA), 1991 [8]
- Niederlande, CUR Recommendation 29, 1992 [9]

4. Vorversuche zur Wasseraufnahme von epoxidharzbeschichteten Edelstahlplatten

Der Zusammenhang von Beschichtungswiderstand und Wasseraufnahme wurde vorab unter Laborbedingungen untersucht. Hierzu wurden drei einseitig mit Epoxidharz beschichtete Edelstahlplatten in einer künstlichen Betonporenlösung (pH=13 und 3% Chlorid) bei 20°C gelagert.

Die Beschichtungsdicke, das Gewicht des reinen Beschichtungsmaterials sowie das Gesamtgewicht der Platten wurden vor Versuchsbeginn bestimmt. Der Verlauf der gravimetrischen Gewichtszunahme sowie des Beschichtungswiderstands wurden zyklisch erfasst. Der Versuchsaufbau zur Ermittlung des Beschichtungswiderstands ist in Bild 5 dargestellt.

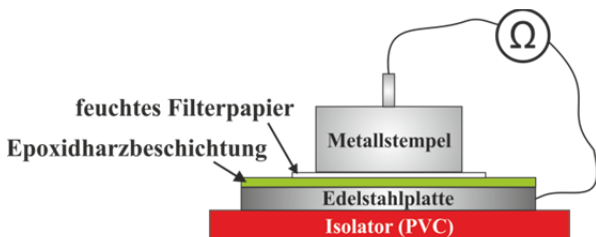


Bild 5: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Bestimmung des Beschichtungswiderstands

Zur Messung wurde ein durchfeuchtetes Filterpapier (d = 8 cm) mittels des Eigengewichts eines Metallstempels vollständig auf die zu untersuchende Beschichtung gepresst. Über ein LCR-Meter wurde der Stempel und die Plattenunterseite elektrisch kontaktiert und so der Beschichtungswiderstand bestimmt. Die Mittelwerte von Gewichtszunahme und Beschichtungswiderstand sind in Bild 6 über die Zeit aufgetragen (inkl. Angabe der mittleren Standardabweichung σ_{mittel}).

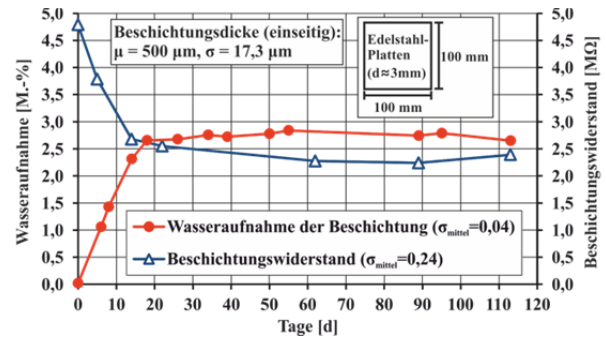


Bild 6: Zeitlicher Verlauf der Wasseraufnahme bzw. des Beschichtungswiderstands von epoxidharzbeschichteten Edelstahlplatten

Bereits nach ca. 20 Tagen wurde eine relative Feuchte-sättigung von ca. 2,7 M.-% bezogen auf das Anfangsgewicht der Beschichtung festgestellt. Parallel hierzu entwickelte sich der Beschichtungswiderstand. Der Widerstand sank bis zum 20. Tag von ca. 4,8 auf 2,4 MΩ ab. Eine weitere Wasseraufnahme bzw. Widerstandsänderung konnte bis zum Versuchsende nach ca. 4 Monaten nicht festgestellt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass auch noch nach einer Einlagerungsdauer von ca. 4 Monaten sehr hohe Beschichtungswiderstände vorherrschen. Der mittlere spezifische Widerstand betrug nach ca. 4 Monaten immerhin noch mehr als 24.000.000 Ωm (vgl. Normalbeton: ca. 500 – 1.000 Ωm).

5. Pilotprojekt „Brücke Schießbergstraße“

5.1 Das Bauwerk

Die Brücke Schießbergstraße in Leverkusen ist eine dreifeldrige massive Plattenbrücke mit einer gesamten Spannweite von ca. 53 m (Bild 7). Sie ist 9,70 m breit und die Plattendicke beträgt 1,12 m. Die Brücke ist in Längsrichtung mit nachträglichem Verbund vorgespannt. Die Brücke wurde 1991 hergestellt.



Bild 7: Außenansicht der Brücke Schießbergstraße in Leverkusen

Um die nicht-tragende Bewehrung in den Brückenkappen vor Tausalzen (Chlorideintrag) zu schützen und damit die Dauerhaftigkeit zu erhöhen, wurden beide Brückenkappen vollflächig mit der damals neusten Generation epoxidharzbeschichteter Bewehrung ausge-

führt. Hierbei wurde die obere und untere Bewehrungslage vollflächig beschichtet (siehe Bild 8).

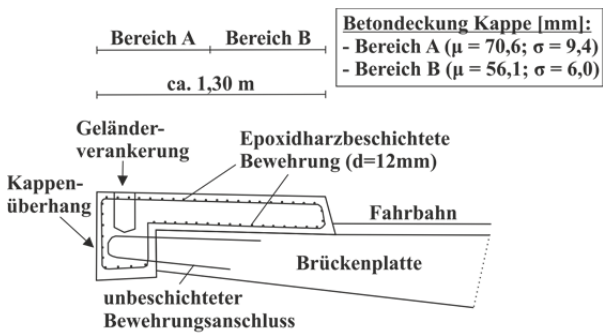


Bild 8: Detail Brückenkappe

Der eingebaute Beton entsprach einem heutigen C35/37. Neuartig für damalige Verhältnisse war der Einsatz von Hochofenzement (CEM III: 400 kg/m³). Bei einem Wassergehalt von 185 kg/m³ und 1774 kg/m³ Gesteinskörnung (Reinkies, Größtkorn: 16 mm) wurde ein w/z-Wert von 0,45 angestrebt. [10] Im Rahmen einer Bauwerksuntersuchung im Mai 2012 wurde die Korrosionsschutzwirkung der eingebauten ECR nach 21 Jahren Nutzungsdauer eingehend untersucht. Neben einer visuellen Begutachtung vor Ort (Rissaufnahme und Kartierung) wurde die Betondeckung zerstörungsfrei gemessen und zahlreiche Bohrkern mit ECR entnommen und für weiterführende Laboruntersuchungen ans Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) zurücktransportiert. Zuvor wurde der Feuchtezustand der Bohrkern sofort vor Ort mittels PE-Folie konserviert. Die in Folie verpackten Bohrkern wurden anschließend am cbm im Laborklima 20°/85% r.F. gelagert. Der Fokus der nachfolgenden Laboruntersuchungen zielte auf Informationen zum Feuchte- und damit zum Beschichtungswiderstand von ECR nach 21 Jahren Praxiseinsatz. Zusätzlich wurden an ausgesuchten Bohrkernen tiefengestaffelte Chloridprofile ermittelt. Ein Überblick zur baulichen Ausführung der Brücke, zu festgestellten Rissen und Entnahmestellen ist in Bild 9 dargestellt.

Die Festlegung der Bohrkernentnahmestellen erfolgte auf Grundlage einer zuvor durchgeführten Potentialfeldmessung. So konnten gezielt auffällige Bereiche mit potentiell hoher Korrosionswahrscheinlichkeit beprobt werden. Die größte Rissbreite (0,35 mm) wurde bei Riss R.3 gemessen. Der Bohrkern D wurde beispielsweise direkt im Rissbereich R.3 entnommen (siehe Bild 9). Die genauen Koordinaten der Bohrkernentnahmestelle sind in Tabelle 1 dokumentiert. Der Koordinatenursprung zur Vermaßung wurde auf den „Fahrbahnübergang Westseite“ festgelegt (Bild 9).

6. Ergebnisse am Bauwerk

Die erste visuelle Begutachtung der Brückenkappe war durchweg positiv. Es konnten keinerlei korrosionsbedingte Risse oder Abplatzungen festgestellt werden. Lediglich last- bzw. spannungsinduzierte Risse, welche von den Rissbreiten keine Einschränkungen in der Dauerhaftigkeit erwarten lassen (i.d.R. Rissbreiten kleiner 0,30 mm), wurden registriert. Die gemessenen Betondeckungen (Ergebnisse siehe in Bild 8) waren überdurchschnittlich hoch (i.d.R. immer größer als 50 mm). Zudem konnte eine leichte Zunahme der Betondeckung vom Fahrbahnrand hin zur Kappenaußenseite beobachtet werden (d.h. die Entwässerung verläuft Richtung Fahrbahn). Die zum Teil beim Bohren freigelegten beschichteten Stäbe waren alle in einwandfreiem Zustand. Das heißt, es konnten keinerlei Fehlstellen oder Enthaltungen an der Beschichtung bzw. Anzeichen von Korrosion (auch an den Schnittflächen) festgestellt werden. Die ursprünglich glänzend rote Beschichtungsfarbe war auch nach 21 jähriger Einlagerung im alkalischen Milieu des Betons unverändert erhalten. Ein entnommener Bohrkern mit freigelegter ECR ist beispielhaft in Bild 10 dargestellt.

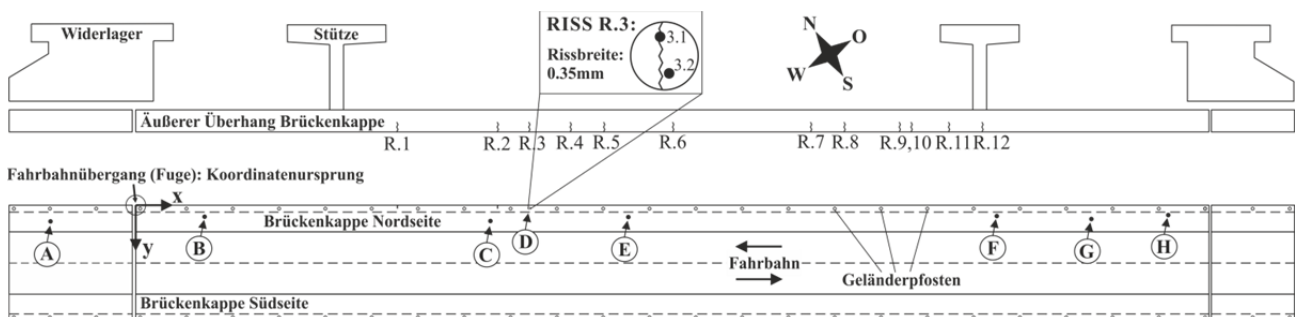


Bild 9: Maßstäbliche Darstellung der Brückenoberseite inklusive Bohrkernentnahmestellen (A bis H) und festgestellter Risse (R.1 bis 12)



Bild 10: Freigelegte epoxidharzbeschichtete Bewehrung an der Bruchfläche (Unterseite) eines entnommenen Bohrkerns

Um in der damaligen Herstellungsphase die Beschichtung möglichst nicht zu beschädigen, wurde zum Verbinden der Stäbe isolierter Bindedraht verwendet, siehe Bild 10.

Ergänzende Untersuchungen zum tiefengestaffelten und damit auf Bewehrungshöhe vorliegenden Chloridgehalt wurden anhand entnommener Bohrmehlproben aus den Bohrkernen durchgeführt. In Bild 11 sind vier repräsentative Chloridprofile dargestellt.

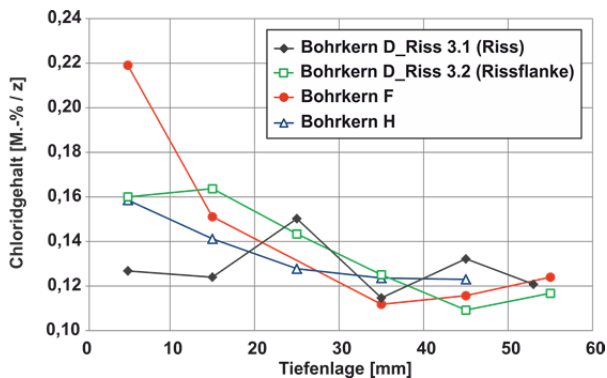


Bild 11: Ergebnisse der Chloridanalyse anhand tiefengestaffelter Bohrmehlproben aus repräsentativen Bohrkernen

Im Rissbereich R.3 wurden zwei Chloridprofile ermittelt (Bild 11). Das Profil 3.1 repräsentiert den direkten Rissbereich, das Profil 3.2. die Rissflanke (siehe Bild 9). An der Rissflanke (3.2) konnten im Vergleich zum Riss selbst im oberflächennahen Bereich (0-20 mm) erhöhte Chloridwerte gemessen werden. Dieses Phänomen kann durch regenbedingte Auswaschungen der Chloride direkt im Riss erklärt werden. Die Profile für Bohrkerne F und H sind repräsentativ für alle restlichen Chloridergebnisse dargestellt.

Die relevanten Chloridgehalte auf Bewehrungshöhe (mittlere Betondeckung im Kappenbereich A: ca. 70 mm, siehe Bild 8) liegen alle weit unter dem nach Breit [11] angegebenen unteren Grenzwert von ca. 0,25 M.-%/z für den kritischen Chloridgehalt. Das heißt, dass beispielsweise eine obere den Chloriden ausgesetzte unbeschichtete Bewehrungslage auch nach 21 Jahren Nutzungsdauer immer noch passiv vorliegen

würde. Gemäß Bild 4 befindet sich das Bauwerk hinsichtlich des Schädigungsgrades hierdurch noch eindeutig in der Einleitungsphase.

7 Labor- vs. Praxisergebnisse

Um die Korrosionsschutzwirkung in der Einleitungsphase dennoch beurteilen zu können, wurden die in den Bohrkernen befindlichen epoxidharzbeschichteten Stähle mit Hilfe der elektrochemischen Impedanz Spektroskopie (EIS) untersucht.

Die EIS ist ein zerstörungsfreies dynamisches Messverfahren, um Messungen und Analysen elektrochemischer Systeme durchzuführen [12]. Bei Korrosionsvorgängen in Gegenwart von Elektrolyten laufen an der Oberfläche der Bewehrung dynamische elektrochemische Prozesse ab. Für die Untersuchung wird das System durch eine Wechselspannung ($\Delta U = 10\text{mV}$) angelegt, dessen festzulegende Frequenz (ω) innerhalb eines weiten Bereiches variiert wird. Dadurch wird das System aus seiner Gleichgewichtslage gebracht und seine resultierende Reaktion auf diese Auslenkung aufgezeichnet. Die Impedanz Z (Wechselstromwiderstand) lässt sich dabei als frequenzabhängiger Zusammenhang zwischen Erregersignal und Systemantwort definieren.

Bei der Auswertung der gemessenen Impedanzspektren versucht man, die systemspezifischen physikalischen Parameter des elektrochemischen Systems durch ein Ersatzschaltbild (ESB) zu beschreiben, welches denselben Frequenzverlauf wie das gemessene Spektrum aufweist. Zur Bewertung einer intakten organischen Beschichtung mit hoher Schutzwirkung kann ein ESB entsprechend dem sogenannten Randles-Element verwendet werden [13], siehe Bild 12.

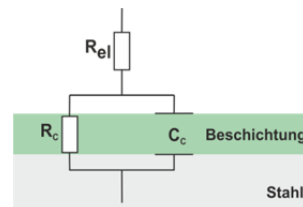


Bild 12: Schematische Darstellung des verwendeten Ersatzschaltbildes (Randles-Element) für eine intakte Beschichtung

Hierbei wird der Elektrolytwiderstand des Betons durch einen vorgeschalteten ohmschen Widerstand R_{el} abgebildet. Der Widerstand der Beschichtung und deren Kapazität werden durch ein parallel geschaltetes R-C-Element, bestehend aus dem Beschichtungswiderstand R_c und der Beschichtungskapazität C_c , ausgedrückt, Bild 12. Im Versuch werden Impedanzspektren durch rechnergestützte Messgeräte aufgenommen und ausgewertet. Die numerische Lösung von Transferfunktionen liefert quantitative Ergebnisse für die im ESB verwendeten Elemente, hier speziell für den Beschichtungswiderstand R_c . Die Ergebnisse für die einzelnen Elemente im ESB können im Bode-Plot (Ergebnis-Plot) auch graphisch abgelesen werden. Dieser

Zusammenhang sowie ein beispielhaftes Versuchsergebnis sind in Bild 13 dargestellt.

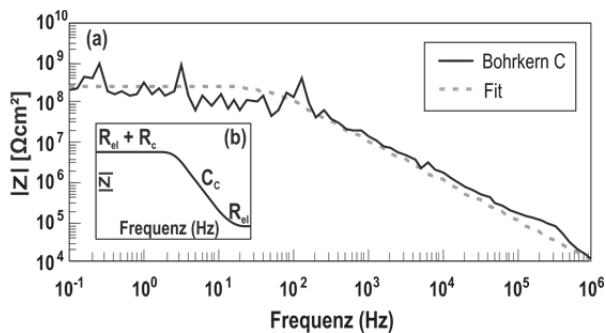


Bild 13: (a) Ergebnis der Impedanzmessung an Bohrkern C im Bode-Plot (vgl. Tabelle 1). (b) Schematische Darstellung der graphischen Zusammenhänge im Bode-Plot.

Die experimentelle Durchführung einer Impedanzmessung setzt einen klassischen Drei-Elektroden-Versuchsaufbau voraus. Im vorliegenden Fall wurde dieser Aufbau gemäß Bild 14 realisiert.

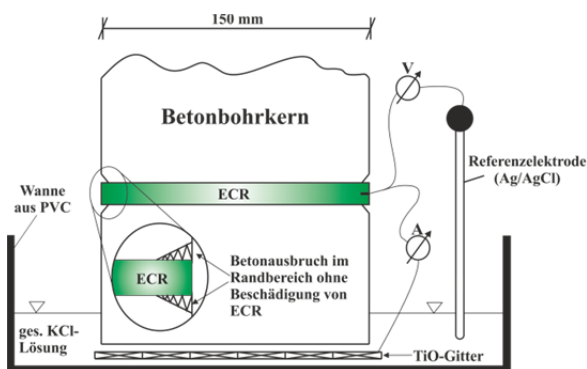


Bild 14: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Durchführung einer elektrochemischen Impedanzspektroskopie (EIS) an einem Bohrkern

Der zu untersuchende Bohrkern wurde mit der glatten Betonoberfläche auf einem Titanmischoxidgitter (Gegenelektrode) in einem Wasserbad aus gesättigter KCl-Lösung gelagert. Als Referenzelektrode wurde eine Ag/AgCl-Elektrode verwendet. Zur Vermeidung eines elektrolytischen Kontaktes zwischen der Schnittfläche von ECR (Arbeitselektrode) und dem Beton, wurde der Beton im Randbereich vorsichtig entfernt, Bild 14. Um eine Betonaustrocknung während der Messung zu vermeiden, wurden alle Versuche unter konstanten Klimabedingungen (20°C und 85% r.F.) durchgeführt. Die Ergebnisse der Beschichtungswiderstände der in den Bohrkernen A bis H verbauten ECR-Proben sind in Tabelle 1 dargestellt.

Es bleibt zu bemerken, dass die in diesem Kapitel dargestellten Ergebnisse zum Beschichtungswiderstand nicht direkt mit denen aus Kap. 4 zu vergleichen sind

(unterschiedliche Messtechnik und Elektrodenoberflächen: LCR vs. EIS).

Tabelle 1: Ergebnisse der Beschichtungswiderstände von ECR-Proben nach 20 Jahren Nutzungsdauer

Bohrkerne	Lage auf der Brückenkappe [m]		Beschichtungswiderstand mittels EIS @ 0,1 Hz [Ωcm^2]
	X - Koordinate	Y - Koordinate	
A	-4,40	0,67	3,16397E+08
B	3,51	0,53	1,22210E+08
C	18,00	0,50	2,25725E+08
D	20,00	0,15	8,84329E+08
E	25,00	0,40	8,37449E+08
F	43,75	0,50	2,96158E+08
G	48,50	0,60	1,46753E+09
H	52,40	0,20	2,94767E+08
Mittelwert			5,55571E+08
MIN			1,22210E+08
MAX			1,46753E+09

Parallel zu den Bohrkernuntersuchungen wurden sechs neue Betonprobekörper (Betondeckung: 20 mm) mit neuwertigen epoxidharzbeschichteten Bewehrungsstäben hergestellt und ab dem 1. Tag in Klima 20°/85% r.F. gelagert. Am Bauwerk und in den neuen Laborversuchen lagen ähnliche Beschichtungsdicken vor. In vergleichbarer Weise zu den Bohrkernen wurden hier zu zwei verschiedenen Zeitpunkten Impedanzmessungen durchgeführt. Die erste Messung wurde noch am Tag der Herstellung durchgeführt und mit „0 d“ bezeichnet. Nach 30 Tagen („30 d“) wurde eine zweite Messung durchgeführt. Alle Ergebnisse (Labor und Praxis) sind in Form von Mittel- und MIN/MAX-Werten in Bild 15 zusammengestellt.

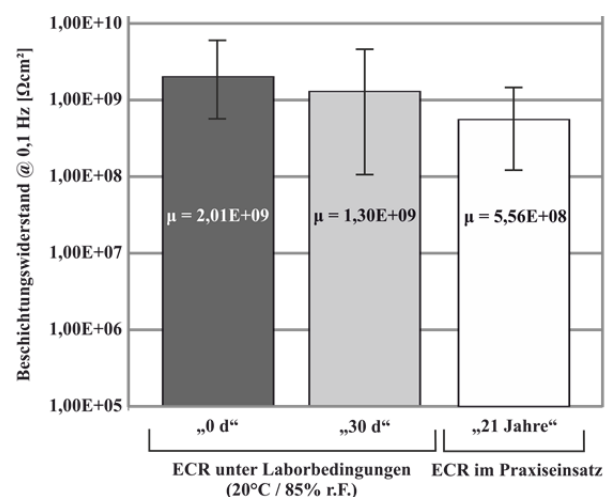


Bild 15: Durch EIS ermittelte Beschichtungswiderstände von ECR anhand Laborprobekörper nach 0d bzw. 30d im Vergleich zu ECR nach 20 jährigem Praxiseinsatz

Das Ergebnis zeigt, dass der Beschichtungswiderstand der entnommenen Bauwerksproben auch nach

20 Jahren Praxiseinsatz (natürliche Witterungsbedingungen) mit Laborproben, welche lediglich für 30 Tage in Klima 20°/85% r.F. eingelagert wurden, vergleichbar ist. Der auch noch nach 20 Jahren wirksame Beschichtungswiderstand von im Mittel $5,56 \cdot 10^8 \Omega\text{cm}^2$ bedeutet, dass die Beschichtung weder durch den anstehenden pH-Wert des umgebenden Betons, noch durch Enthaftungs- oder Alterungsprozesse wesentlich geschädigt wurde. Das heißt, die vorgefundene epoxidharzbeschichtete Bewehrung liegt auch nach 20 Jahren Nutzungsdauer noch neuwertig im Beton vor. Es ist anzunehmen, dass die Beschichtung auch in Zukunft eine hochwirksame Barriere für auf Bewehrungshöhe ankommende Chloride darstellen wird. Dass das Beschichtungsmaterial fast unverändert im Vergleich zum neuwertigen Ursprungsmaterial vorliegt, bestätigten zusätzliche Untersuchungen zur Glasübergangstemperatur T_g . Die an Pulverscherben mit Hilfe von DSC (Differential Scanning Calorimetry) ermittelte T_g stimmte noch mit dem Ursprungsmaterial überein. Eine Verschiebung von T_g hätte ein Indiz für die Alterung bzw. Degradation des Beschichtungsmaterials sein können.

8. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die zum Teil kontroverse Berichterstattung zur Korrosionsschutzwirkung von ECR im Praxiseinsatz stellte die Motivation zur Untersuchung des einzigen und derzeit letzten deutschen Pilotprojektes dar. Zum Einsatz kam im Jahr 1991 die noch heute aktuellste Generation von Epoxidharzbeschichtungen der Fa. Akzo Nobel Powder Coatings GmbH. Die baupraktische Ausführung und Einbaubedingungen (z.B. erhöhte Sicherheitsmaßnahmen zur Fehlstellenvermeidung) beruhten auf der damals gültigen Richtlinie des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt), [7].

Die damaligen Voraussetzungen (Material, vollflächige Beschichtung, Einbaubedingungen usw.) sowie die über die Zeit vorherrschenden Klimabedingungen vor Ort (Leverkusen), ließen ein bis heute wirksames Korrosionsschutzsystem entstehen. Die Möglichkeit das bestehende Korrosionsschutzsystem nach 20 Jahren Nutzungsdauer mit aktuellen Untersuchungsmethoden (hier: Beschichtungswiderstand über EIS) zu vergleichen, lieferte neue Erkenntnisse zum Langzeitverhalten und damit der Langzeitstabilität des Korrosionsschutzpotentials epoxidharzbeschichteter Bewehrung:

Die untersuchte epoxidharzbeschichtete Bewehrung liegt auch nach 20 Jahren Praxiseinsatz „wie neu“ vor!

Aufgrund fehlender bzw. nicht feststellbarer Fehlstellen vor Ort und zugleich niedriger Chloridgehalte auf Bewehrungshöhe können mit den dargestellten Untersuchungen nur Aussagen zur Einleitungsphase getroffen werden. Die Korrosionsschutzwirkung von ECR bei vorhandenen Fehlstellen und/oder Chloridgehalten über dem kritischen Chloridgehalt (Schädigungsphase, Bild 4) kann nicht beurteilt werden.

Mit dieser Fragestellung und mit dem Gesamtziel das Korrosionsschutzpotential über die gesamte Lebensdauer (Einleitungs- und Schädigungsphase) quantitativ zu bewerten, beschäftigt sich derzeit ein aktuelles Forschungsvorhaben (Projektende: 2013). Innerhalb des Projektes ist eine zweite Brückenuntersuchung in der Schweiz vorgesehen. An dieser Brücke wurden beide monolithisch hergestellten Brüstungen halbseitig mit ECR ausgeführt. Bei der Herstellung im Jahr 1988 wurden gezielt definierte Fehlstellen eingebaut. Hier bestünde die Möglichkeit die Performance von un- und epoxidharzbeschichtetem Bewehrungsstahl an einem Bauwerk in der Schädigungsphase zu vergleichen. Etwaige ausstehende positive Ergebnisse hierzu, würden diesem Korrosionsschutzsystem vielseitige Anwendungsfelder in Zukunft eröffnen.

Danksagung

Für die Möglichkeit zur Durchführung unserer Untersuchungen vor Ort bedanken wir uns bei der Bayer Real Estate GmbH und der Currenta GmbH & Co. OHG recht herzlich. Ein spezieller Dank gilt Herrn H. Mosblech von den Technischen Betrieben der Stadt Leverkusen AöR für die tatkräftige Unterstützung in der Planungsphase und die Betreuung vor Ort.

Literaturverzeichnis

- [1] Hartley, J. (1994). Improving the performance of fusion-bonded epoxy-coated reinforcement. Concrete, Vol. January/February, pp. 12-15.
- [2] FIB Bulletin 59. (2011). Condition Control and Assessment of Reinforced Concrete Structures. State-of-Art Report. Switzerland: International Federation for Structural Concrete (fib).
- [3] Zintel M., Gehlen C., Prust P. (2011). Epoxy-Coated Reinforcement – Life Cycle Cost Considerations. Proceedings of Concrete Solutions 2011, 4th International Conference on Concrete Repair, Dresden, Germany, 26-28 September.
- [4] ASTM A 775/A 775M - 07b. (2007). Standard Specification for Epoxy-Coated Steel Reinforcing Bars. American Society for Testing and Materials.
- [5] BS ISO 14654:1999. (1999). Epoxy-coated steel for the reinforcement of concrete. British Standards Institution.
- [6] BS ISO 14656:1999. (1999). Epoxy powder and sealing material for the coating of steel for the reinforcement of concrete. British Standards Institution.
- [7] DIBt. (1990). Richtlinie für Prüfungen an Betonstählen mit Epoxidharz-Beschichtung. Deutsches Institut für Bautechnik.
- [8] ASTRA. (1991). Richtlinien zur Anwendung von epoxidharzbeschichteten Betonstählen. Schweizer Bundesamt für Straßenbau.
- [9] CUR Aanbeveling 29. (1992). Met Epoxy Bekleed Betonstaal. Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving.
- [10] Wolff R. & Mießeler H.J. (1991). Die Brücke Schießbergstraße in Leverkusen. Beton 4/91.

- [11] Breit, W. (1997). Untersuchungen zum kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt von Stahl in Beton. Dissertation, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen, Aachen.
- [12] Ende D., Mangold K.M.(1993). Impedanzspektroskopie. Chemie in unserer Zeit. 27. Jahrg. 1993, Nr.3.
- [13] Schießl P., Lay S., Gehlen C. (2000). Korrosionsmechanismen bei der Unterrostung von Betonstählen mit Beschichtungen auf organischer und mineralischer Basis. Forschungsbericht F3002/00. Centrum Baustoffe und Materialprüfung der TU München.